

RESEARCH OUTPUTS / RÉSULTATS DE RECHERCHE

L'analogie entre la langue française et la chimie

Dehon, Jérémy; Snauwaert, Philippe

Published in:
Education et didactique

DOI:
[10.4000/educationdidactique.3161](https://doi.org/10.4000/educationdidactique.3161)

Publication date:
2018

Document Version
le PDF de l'éditeur

[Link to publication](#)

Citation for pulished version (HARVARD):

Dehon, J & Snauwaert, P 2018, 'L'analogie entre la langue française et la chimie: analyse linguistique et didactique', *Education et didactique*, VOL. 12, Numéro 2, p. 9-27.
<https://doi.org/10.4000/educationdidactique.3161>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

L'analogie entre la langue française et la chimie : analyse linguistique et didactique

*The analogy between chemistry and French language: a linguistic and didactical
analysis*

Jérémy Dehon et Philippe Snauwaert



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/educationdidactique/3161>

DOI : [10.4000/educationdidactique.3161](https://doi.org/10.4000/educationdidactique.3161)

ISSN : 2111-4838

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 21 décembre 2018

Pagination : 9-27

ISBN : 978-2-7535-7711-4

ISSN : 1956-3485

Référence électronique

Jérémy Dehon et Philippe Snauwaert, « L'analogie entre la langue française et la chimie : analyse linguistique et didactique », *Éducation et didactique* [En ligne], 12-2 | 2018, mis en ligne le 21 décembre 2020, consulté le 07 janvier 2021. URL : <http://journals.openedition.org/educationdidactique/3161> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.3161>

L'ANALOGIE ENTRE LA LANGUE FRANÇAISE ET LA CHIMIE : ANALYSE LINGUISTIQUE ET DIDACTIQUE

Jérémy Dehon
université de Namur, unité de didactique de la chimie
Philippe Snauwaert
université de Namur, unité de didactique de la chimie

L'analogie entre la langue française (plus particulièrement son alphabet) et la chimie est utilisée dans bon nombre de manuels scolaires, de livres de références de niveau universitaire et d'articles de recherche en didactique de la chimie. Nous avons analysé les différentes versions de cette analogie en utilisant les cadres théoriques de Gentner et Holyoak. Il en résulte que la version de l'analogie mettant en correspondance les lettres de l'alphabet et les symboles chimiques présente le fonctionnement le plus apte à marquer les élèves. Les conséquences didactiques potentielles de cette analogie sont ensuite développées. Enfin, nous proposons d'utiliser lors du cours de chimie une démarche d'analogie par comparaison de situations, opposant les deux systèmes de signes, et soulignant ainsi les spécificités de la langue symbolique des chimistes.

Mots-clés : analogie, alphabet, symbole chimique, atome, langage.

The analogy between chemistry and French language: a linguistic and didactical analysis

The analogy between French language and chemistry is used in many chemistry textbooks (for high school and university) and research articles in the field of chemical education. We have analyzed different versions of this analogy by using the theoretical frameworks of Gentner and Holyoak. As a result, we observed that the analogy version bonding French alphabet and chemical symbols is the more able to operate in students' minds. Therefore, the use of this version of alphabet analogy in classrooms can potentially lead novice learners to conceptual and representational misunderstandings. Instead of the usual way, we propose to exploit the limits of this analogy in an analogical encoding process designed to emphasize the divergences between the two sign systems and thus specify the proper characteristics of the symbolic language of chemistry.

Keywords: analogy, alphabet, chemical symbol, atom, language.

Nos plus vifs remerciements vont à Sophie Collonval et Dominique Coppée, chercheuses au département de langues et littératures françaises et romanes de l'université de Namur, pour leur relecture experte et leurs conseils avisés.

- « Si l'atome était une lettre,
une molécule serait un mot »
(Matthys *et al.*, 2011).
« Les phonèmes sont en quelque sorte
les "atomes" du langage »
(Siouffi et Van Raemdonck, 2012).

La première de ces citations provient d'un manuel scolaire belge à destination d'élèves de 14-15 ans, quand la seconde est extraite d'un livre de référence universitaire en linguistique. Les deux énoncés ci-dessus sont des exemples frappants de la connexion que des auteurs issus de domaines variés réalisent entre le français moderne et la chimie. Ce rapprochement entre ces deux champs généraux se retrouve cependant plus fréquemment dans des manuels scolaires belges (Matthys *et al.*, 2011 ; Pirson *et al.*, 2015) et dans des livres de référence de niveau universitaire (Hill *et al.*, 2008 ; Wouters, 2014 ; Tro, 2015) traitant spécifiquement de chimie que dans des ouvrages dédiés à la linguistique ou à l'apprentissage de la langue française. On le trouve également dans des livres et articles de didactique de la chimie (Markow, 1988 ; Laszlo, 1993 ; Jacob, 2001 ; Nemeth, 2006 ; Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012) où le langage des chimistes est étudié et décrit avec les outils développés par les linguistes. Enfin, de nombreux sites internet et revues généralistes s'intéressant à l'enseignement de la chimie relaient l'hypothèse de l'existence d'un « alphabet de la chimie » (Eastes, 2010) et d'une « analogie de l'alphabet » (David, 2002). En bref, penser la chimie

en corrélation avec une langue naturelle, comme le français, semble être une idée répandue.

Si l'on se concentre sur les manuels scolaires et livres de référence de niveau universitaire, on remarque une grande disparité dans la manière de présenter ce que nous appellerons l'« analogie de l'alphabet¹ ». Certains auteurs rapprochent les lettres de l'alphabet et les éléments chimiques, comme Tro (2015, p. 56) : « Tout comme les combinaisons de seulement 26 lettres de l'alphabet en français permettent la formation d'un nombre presque illimité de mots, chacun possédant son sens particulier, les combinaisons des 91 éléments naturels permettent l'existence d'un nombre quasi illimité de composés, chacun possédant ses propriétés propres ». D'autres insistent sur le lien entre les lettres de l'alphabet et les atomes (Matthys, 2011, p. 22). Enfin, Wouters (2014, p. 10), par exemple, insiste sur l'analogie entre les symboles chimiques et les lettres de l'alphabet en déclarant qu'« il convient de mémoriser ces symboles qui constituent l'alphabet de base du chimiste ». Si, dans ces cas, les lettres de l'alphabet constituent toujours le pendant linguistique de l'analogie, le pendant chimique varie ainsi selon les auteurs (symbole chimique, atome ou élément). Il en va de même pour la forme de présentation de cette analogie : certains optent pour un tableau comparatif « en français/en chimie » (tableau 1) (Pirson *et al.*, 2015), d'autres pour un plan (Matthys *et al.*, 2011), d'autres encore pour un texte continu (Tro, 2015 ; Wouters, 2014).

Tableau 1. Comparatif entre chimie et langue française

En français	En chimie
Une lettre : p	Un atome : H
Un mot est composé de lettres liées entre elles : je, ami	Une molécule est composée d'atomes liés entre eux : KI, NaOH
Il y a 26 lettres dans notre alphabet : a, b, c...	Il y a une centaine d'atomes connus : H, He, Li...
Avec 26 lettres, on peut écrire un grand nombre de mots : livre, ciel, musique, paix, gâteau, sport...	Avec 100 atomes, on peut former un grand nombre de molécules : KBr, CuCl ₂ , Al ₂ (SO ₄) ₃ , HF, NaCl...
Beaucoup d'assemblages de lettres n'existent pas : tma ! ?	Beaucoup d'assemblages d'atomes n'existent pas : HNaBa ! ?
Dans un mot, l'ordre des lettres n'est pas quelconque : « chimie » et non « michie »	Dans la formule d'une molécule, l'ordre des symboles n'est pas quelconque : CaSO ₄ et non SCaO ₄

Pirson *et al.*, 2015.

Dans tous les cas, l'analogie de l'alphabet semble reposer sur le fait général que des unités simples se combinent en entités plus complexes : les éléments en composés, les atomes en molécules, les symboles chimiques en formules moléculaires et les lettres de l'alphabet en mots. On note également que, dans les manuels et livres de référence consultés, l'analogie de l'alphabet est toujours présentée à titre anecdotique, sans faire l'objet de développements didactiques menant à des activités particulières ou à des objectifs disciplinaires.

Dans les recherches en didactique de la chimie, l'analogie entre langue française et chimie a été développée de multiples façons, notamment en parlant de « grammaire chimique » pour les règles d'écriture des formules moléculaires et des équations chimiques, d'« adjectifs » pour qualifier les symboles des états de la matière, de « verbes » pour décrire le rôle d'une flèche dans une équation de réaction (Nemeth, 2006). Laszlo (1993) va encore plus loin dans le parallélisme en trouvant des équivalents chimiques aux synonymes, accents, ellipses, anagrammes et autres paraphrases. On en oublierait presque les spécificités (notamment l'aspect symbolique) du langage des chimistes, tant la parenté entre les deux domaines paraît étroite. Mais si l'analogie de l'alphabet semble puissante à première vue, il convient de nuancer sa pertinence en en développant les fondements et les conséquences appliquées dans le champ de la didactique de la chimie : quelles sont les caractéristiques de cette analogie selon les cadres théoriques existants ? Peut-on envisager une imprégnation probable de cette analogie dans l'esprit des élèves ? Ensuite, nous pouvons nous interroger sur les implications potentielles d'une telle analogie sur la compréhension par les élèves de la langue symbolique des chimistes : ne sont-ils pas susceptibles d'intégrer des propriétés langagières valables dans le domaine de la langue française mais incorrectes dans le domaine de la chimie ? Un rapprochement trop étroit entre symbole chimique et lettre de l'alphabet n'est-il pas un facteur de déconnexion entre le symbole chimique et les objets et concepts qu'il représente ?

Cet article a pour vocation d'éclairer ces problématiques en employant des concepts de linguistique et de terminologie aptes à décrire les systèmes langagiers. Par ce biais, comme d'autres chercheurs avant nous, nous émettons l'hypothèse que le code symbolique des chimistes peut être étudié comme une

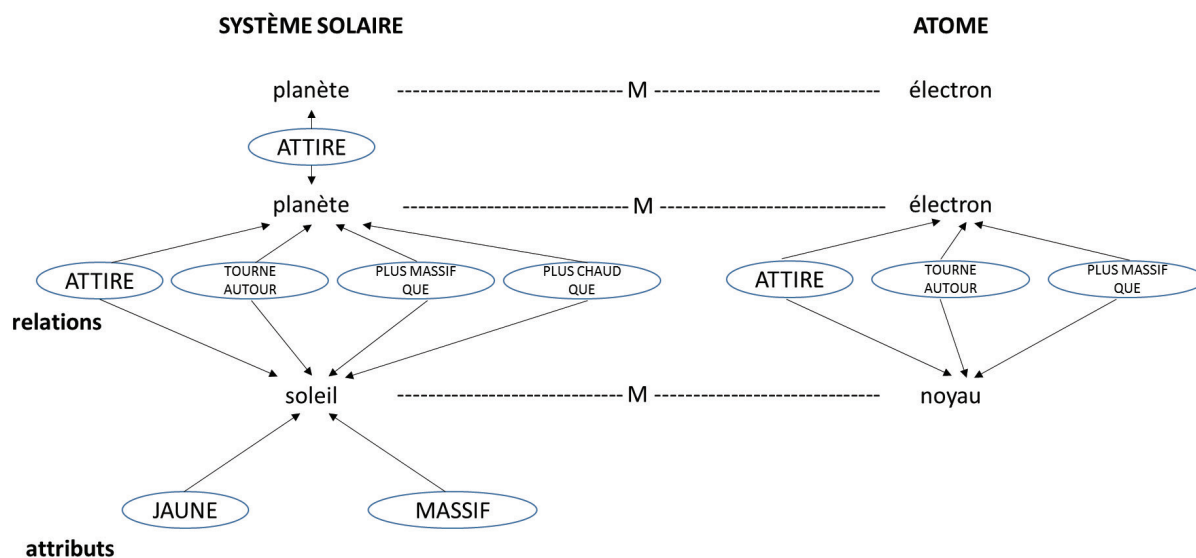
langue avec les outils forgés par les linguistes, cela avec toutes les précautions d'usage vu les caractéristiques singulières qu'il présente (Mestrallet, 1980 ; Laszlo, 1993 ; Jacob, 2001 ; Dumon et Mzoughi-Khadraoui, 2014 ; Taber, 2015). Notre étude répond aussi à la demande pressante de recherches portant spécifiquement sur les systèmes sémiotiques utilisés dans l'enseignement de la chimie (Song et Carheden, 2014 ; Taber, 2015). En préambule, nous allons préciser l'usage des analogies en sciences ainsi que rappeler brièvement quelques cadres théoriques décrivant le concept d'analogie. Dans un deuxième temps, les caractéristiques principales des deux domaines impliqués dans l'analogie seront détaillées. Ensuite, nous développerons le fonctionnement de l'analogie de l'alphabet selon les cadres théoriques évoqués, en ciblant particulièrement le lien entre symboles chimiques et lettres de l'alphabet. Enfin, nous examinerons des implications didactiques potentielles ainsi qu'une proposition concrète d'utilisation de l'analogie de l'alphabet dans le cours de chimie.

LES ANALOGIES EN SCIENCES : CADRES THÉORIQUES ET USAGES

Cadres théoriques

L'approche structurale de Gentner a fourni une des définitions les plus fécondes de l'analogie. Celle-ci serait une forme de comparaison qui dépend des similitudes syntaxiques existant entre une source (*base domain*) et une cible (*target domain*). L'analogie est ainsi une mise en correspondance d'objets ayant des attributs (ou propriétés), et présentant des relations entre eux dans leur propre domaine (Sander, 2000). Si l'on prend l'exemple de l'analogie entre le modèle atomique de Rutherford et le système solaire, on peut représenter aisément les relations et attributs des objets composant l'analogie (figure 1). Les flèches pointent, par convention, vers les objets en partant des relations ou des attributs considérés.

Figure 1. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie entre modèle de Rutherford et système solaire



D'après Gentner, 1983.

Dans sa typologie des modes de comparaison, Gentner décrit l'analogie comme une comparaison dans laquelle ce sont essentiellement les relations qui sont mises en correspondance entre la source et la cible, et pas (ou peu) les attributs des objets. *A contrario*, elle décrit la « similitude littérale » comme une situation dans laquelle tant les attributs d'objets que les relations sont mis en correspondance. Nous voyons d'emblée que la comparaison entre lettres de l'alphabet et les symboles chimiques/atome/élément relève bien de l'analogie selon Gentner, en ce qu'elle se base principalement sur la mise en correspondance de relations entre objets simples (lettres, symboles chimiques) et objets complexes (mot, formules moléculaires), composés de ces objets simples.

Dans le cadre théorique de Holyoak, des similitudes pragmatiques et sémantiques sont ajoutées au cadre de Gentner, basé uniquement sur les similitudes syntaxiques. En effet, il serait nécessaire de prendre en compte les buts, les ressources ou encore les contraintes des domaines source et cible afin de décrire plus précisément l'analogie. Comme illustration, Holyoak propose de représenter l'analogie entre le problème d'une tumeur à détruire et le problème d'une forteresse à capturer selon des aspects pragmatiques (tableau 2).

Il est clair ici que ce sont bien les similitudes de buts et de contraintes qui sont mises en correspondance dans cette analogie. Cependant, les similitudes syntaxiques sont tacites dans le cadre de Holyoak : les relations entre les objets ainsi que les attributs sont les éléments supportant les similitudes sémantiques et pragmatiques. Par exemple, c'est la relation commune (« capable de détruire ») entre rayon et tumeur d'une part, et entre armée et forteresse d'autre part, qui permet la construction de la similitude de buts.

Ensuite, Sander (2000), propose de considérer l'analogie comme une catégorisation à part entière. Réaliser une analogie consisterait donc à trouver des correspondances entre une source et une cible, et ainsi créer une nouvelle catégorie ou élargir une catégorie existante. Par exemple, durant l'enfance et l'adolescence, le concept de mère évolue par analogies successives d'une catégorie très étroite (la mère qui nourrit, qui soigne l'enfant) à une catégorie plus large intégrant les mères chez les animaux et les mères métaphoriques (« mère patrie », « mère poule »).

Ces trois cadres théoriques sont complémentaires en ce qu'ils précisent le type de comparaisons pouvant être définies comme des analogies, selon l'angle de vue adopté. Enfin, il est utile de mention-

Tableau 2. Analyse selon le cadre de Holyoak de l'analogie entre le problème de la tumeur à détruire et le problème de la forteresse à capturer

Schéma de problème	Problème de la tumeur	Problème de la forteresse
Buts	Utiliser des rayons pour détruire une tumeur	Utiliser une armée pour capturer une forteresse
Ressources	Puissance des rayons suffisante	Importance de l'armée suffisante
Contraintes	Ne pas administrer une forte intensité des rayons à partir d'une seule source	Ne pas envoyer une troupe importante par une seule route
Solution	Administrer des rayons de faible intensité provenant simultanément de plusieurs directions	Envoyer des petits groupes de soldats simultanément par plusieurs routes
Résultat	La tumeur est détruite par les rayons	La forteresse est capturée par l'armée

D'après Gick et Holyoak, 1980.

ner l'existence des analogies naïves ou spontanées (proches des préconceptions), construites par les élèves sans incitation par le professeur. Ces analogies naïves (comme toutes les analogies) se réalisent d'autant plus facilement dans l'esprit des élèves que le domaine source est proche du domaine cible, permettant ainsi une extension du domaine de validité (Hofstadter et Sander, 2013).

Usage des analogies en sciences

Les analogies sont utilisées massivement par les chercheurs en sciences, mais également par les enseignants de sciences. Les exemples sont particulièrement nombreux en physique : analogie entre loi de Coulomb et loi de la gravitation de Newton, entre le courant électrique et un débit d'eau, entre la Terre et un aimant, etc. (Podolefsky et Finkelstein, 2006). On trouve également trace d'usages d'analogie en chimie pour décrire les modèles atomiques (*plum pudding*, système solaire) ou aborder le concept d'élément chimique (Khanfour-Armalé et Le Maréchal, 2008). Les principaux rôles des usages des analogies dans l'enseignement sont de deux types : proposer une terminologie pratique qui permette une communication aisée du concept (ou de la catégorie), et rendre possible des inférences à partir de la mise en correspondance de deux domaines.

QUESTIONS DE RECHERCHE

Nous formulons trois questions de recherche qui nous permettront d'analyser précisément les ressorts de l'analogie de l'alphabet :

1. Quelles sont les caractéristiques des domaines source (langue française orale et son écriture graphique) et cible (chimie et son écriture symbolique) ? ;
2. Comment fonctionne cette analogie dans les cadres théoriques de Gentner et de Holyoak ? ;
3. Quels sont les impacts didactiques potentiels de l'usage de l'analogie de l'alphabet sur la compréhension et l'utilisation de l'écriture symbolique chimique par les élèves ?

CARACTÉRISTIQUES DU DOMAINE SOURCE

La langue française, et plus particulièrement sa structure et son écriture graphique, constitue le plus souvent le domaine source de l'analogie de l'alphabet. Pour entamer ce point particulier de notre étude, il est utile de décrire brièvement certaines notions de linguistique. D'un point de vue phonologique, une langue ordinaire est constituée d'unités distinctives appelées « phonèmes », entités qui forment les unités significatives minimales appelées « morphèmes ». Les morphèmes sont les éléments constitutifs des mots ou « lexèmes »². Ainsi, le lexème <pain> est formé phonologiquement d'un seul morphème, constitué lui-même des deux phonèmes /p/ et /ɛ/³. Ces éléments de langue peuvent être reproduits à

Jérémy Dehon, Philippe Snauwaert

l'écrit sous la forme de graphèmes, unités graphiques représentant les unités distinctives orales que sont les phonèmes (Lazard, 2006).

L'alphabet latin, quant à lui, est un ensemble de symboles⁴ destinés à représenter graphiquement les phonèmes d'une langue, donc à reproduire des sons. Chacun de ces symboles est appelé « lettre ». Les graphèmes peuvent être simples ou complexes selon le nombre de lettres qu'ils contiennent. Dans l'exemple évoqué, <pain> est un lexème constitué d'un graphème simple (<p> pour le phonème /p/) et d'un graphème complexe (<ain> pour le phonème /ɛ̃/).

Il est à noter que l'ensemble des vingt-six lettres de l'alphabet n'épuisent pas l'ensemble des phonèmes (au nombre de trente-quatre) exprimés en français moderne. Une combinaison de lettres est donc parfois nécessaire pour rendre compte de certains phonèmes. C'est le cas avec le phonème /ɛ̃/ qui peut être écrit selon 40 graphèmes différents (de <ain> à <hein> en passant par <ingt>). Le rôle principal des lettres de tout alphabet est donc de reproduire à l'écrit des éléments linguistiques de nature phonologique.

À l'origine, les lettres de l'alphabet français étaient des pictogrammes, des icônes faisant référence plus ou moins explicitement à des objets concrets. L'histoire de la lettre « A » illustre bien le passage du pictogramme à l'idéogramme. La première représentation de cette lettre fut celle d'un bovin, car le taureau se nomme *aleph* en phénicien. Le phonème /a/ était donc représenté par un référent concret (le taureau, plus particulièrement sa tête) parce que son signifiant (*a-leph*) débutait par ce phonème. La représentation subit ensuite des changements d'inclinaison : cornes pointées vers le ciel, puis sur le côté, et enfin vers la terre, pour aboutir au « A » d'aujourd'hui (figure 2). Bien entendu, plus rien dans notre époque moderne ne relie le « A » au taureau des Phéniciens. Ce fut une étape nécessaire : en perdant son contenu sémantique, il était « prêt à devenir ce A

tout court, un A sans signification ni mystère qui ne pourra produire de sens que lié à des séries d'autres signes à l'intérieur des mots » (Zali, 1997). Vidée de ses représentations, la lettre de l'alphabet latin est disponible pour générer une multitude de significations sans jamais interférer par elle-même.

La combinaison de lettres pour former un mot repose sur des règles d'usage. Ainsi, toutes les combinaisons de lettres ne sont pas rencontrées : un mot comme <tma> ne figure dans aucun dictionnaire. En linguistique, c'est, entre autres facteurs, la dimension phonologique qui régule la sélection des mots. Un mot ne prend sa place dans le vocabulaire d'une langue que s'il est énonçable dans celle-ci. La combinaison des phonèmes doit être suffisamment fluide et harmonieuse pour permettre une intégration aisée dans le concert des autres mots.

Ensuite, parmi les combinaisons possibles en langue ordinaire, il apparaît que les graphèmes répondent à un ordre précis, à des contraintes d'écriture. En langue ordinaire, il n'est par exemple pas permis d'écrire le graphème <lampe> sous une autre forme comme <lamp> ou <lamps> (et encore moins <pelam>, qui constituerait une autre combinaison de phonèmes). L'ordre des graphèmes doit avant tout reproduire l'ordre d'énonciation des phonèmes. Cette contrainte vérifiée, la sélection des lettres dans la structuration d'un « mot » (l'usage du <m> avant le <p>, comme dans <lampe>, par exemple) dépendra de règles conventionnelles aux origines diverses : racines étymologiques, règles orthographiques classiques ou modernes, évolution naturelle de la langue, intégration dans un champ lexical, etc. À la dimension phonologique s'ajoutent donc des dimensions étymologiques, graphiques, morphologiques, syntaxiques, sémantiques et lexicales (Siouffi et Van Raemdonck, 2012).

Enfin, dans un mot, les lettres de l'alphabet n'ont pas d'effet sur le contenu sémantique. En effet, on l'a dit, les lettres de l'alphabet sont (aujourd'hui) purement abstraites, elles ne véhiculent plus aucune signification. De ce fait, les caractéristiques phonologiques de la lettre influent sur l'image acoustique, mais pas sur le contenu sémantique. La lettre « a » peut ainsi générer des images acoustiques différentes selon les partenaires qu'on lui affecte à l'écrit (<ain>, <au>, <â>, <aul>, <ha>, etc.), sans générer de signification supplémentaire par elle-même.

Figure 2. Évolution des graphies de la lettre « A »



Seules quelques graphies jugées pertinentes sont représentées par les auteurs.

Cartier, 2012.

CARACTÉRISTIQUES DU DOMAINE CIBLE – DIFFICULTÉS DIDACTIQUES OBSERVÉES

La chimie, et plus particulièrement la structure de la matière qu'elle propose et son écriture symbolique graphique, constitue le plus souvent le domaine cible de l'analogie de l'alphabet. La matière est organisée, au niveau macroscopique, en unités significatives appelées « substances » ou « corps purs » (par exemple, le chlorure de sodium), lesquelles contiennent des occurrences isolables appelées « éléments chimiques » (par exemple, l'élément « chlore »). Au niveau microscopique, les molécules⁵ composant les corps purs sont constituées d'atomes. Les éléments chimiques et les atomes nécessitent une symbolisation graphique pour transmettre l'information à l'écrit. Ce sont les symboles chimiques imaginés par Berzelius, complétés – vu la découverte de nouveaux éléments – par d'autres symboles forgés par ses successeurs jusqu'à aujourd'hui.

Mais pourquoi, alors qu'il pouvait recourir à d'autres alphabets, Berzelius a-t-il emprunté les lettres de l'alphabet latin dans le but de construire ses symboles chimiques ? La raison en est purement pratique. Au début du XIX^e siècle, un des enjeux majeurs de la chimie naissante était la diffusion massive des découvertes dans toute l'Europe. Or, il apparut que les représentations à dominante iconique de Dalton – qui prenaient par exemple la forme de cercles incrustés de lettres – posaient des problèmes de reproduction typographique donnant lieu à des erreurs grossières qui pouvaient nuire à la compréhension du contenu scientifique. Berzelius proposa alors sa célèbre écriture symbolique composée de lettres majuscules et minuscules, empruntées à l'alphabet latin, compatible avec les contraintes d'impression de l'époque telle que l'insertion dans un texte continu (Edeline, 2009). Cette anecdote éclaire la relation entre l'alphabet latin et les symboles chimiques : c'est pour faciliter l'intégration des symboles chimiques dans un texte en langue ordinaire que les symboles chimiques furent construits au départ de l'alphabet latin.

Les raisons qui président à la création des symboles chimiques sont aussi simples : il s'agit de « faire court », de ramasser en un petit nombre de signes un maximum d'informations intelligibles par une communauté ciblée : les initiés en chimie. Les symboles doivent représenter au mieux les substances tout en occupant l'espace le plus restreint

possible sur une feuille de papier. Les symboles chimiques permettent ainsi de reconstruire sur le papier la structure fine de la matière.

Berzelius construisit son système symbolique selon des règles claires, à la base desquelles figure ce fondement essentiel (Berzelius, 1813) : d'abord, il faut prendre la lettre initiale en majuscule du nom latin de chaque élément, et se limiter à cette seule initiale pour les métalloïdes⁶ (par exemple, « C » pour « carbonicum »). Ensuite, dans le cas des métaux, la deuxième lettre en minuscule doit être ajoutée à l'initiale, si la première lettre est commune à deux substances (par exemple, « Co » et « Cu », pour « cobaltum » et « cuprum ») ; enfin, toujours dans le cas des métaux, la première consonne distincte doit être ajoutée si les deux premières lettres sont communes à deux substances (par exemple, « Sb » et « Sn », pour « stibium » et « stannum »). Cependant, de nombreux écarts aux règles de Berzelius sont observables : « Na », « K », « Zn » ou « W » ne suivent pas les règles originelles⁷. Mais les symboles chimiques proviennent tous de l'abréviation de noms (essentiellement issus du latin) selon des règles syntaxiques arbitraires.

En chimie, c'est dans les propriétés intimes des atomes qu'il faut chercher les paramètres favorisant une combinaison (une molécule) plutôt qu'une autre. Tous les atomes, à l'exception des atomes de la famille des gaz rares, visent à la stabilisation énergétique via la formation d'un assemblage. La valence ou potentiel de liaison est l'un des paramètres associés à la formation des combinaisons. Par exemple, on déduit la tétravalence du carbone de l'impossibilité de la formation d'un assemblage comme « CH₅ » et de l'existence, a contrario, de la molécule « CH₄ », le méthane. En chimie, les combinaisons permises d'atomes répondent à des impératifs énergétiques, dont la valence est un des outils de prédiction pour les élèves.

Par ailleurs, au-delà des impératifs énergétiques qui régulent l'arrangement entre atomes de soufre, d'oxygène et d'hydrogène, la formule moléculaire de l'acide sulfurique doit s'écrire « H₂SO₄ » et non « SH₂O₄ ». Il est à noter que l'ordre d'écriture des symboles chimiques dans une formule moléculaire a subi de profondes modifications au fil des changements de convention accompagnant souvent les progrès techniques et théoriques (Dagognet, 1969). En chimie minérale, l'écriture actuelle se base généralement sur l'ordre croissant d'électronégativité. La

formule chimique de l'acide sulfurique s'écrit ainsi H_2SO_4 , car l'électronégativité de l'hydrogène (2,1) est inférieure à celle du soufre (2,5), elle-même inférieure à celle de l'oxygène (3,5). La même règle s'applique aux sels ou aux oxydes. De nombreux autres cas viennent cependant bousculer la hiérarchie établie et démontrer la souplesse de l'écriture des chimistes : les hydroxydes (comme NaOH), les bases aminées (comme NH_3), et la symbolique en chimie organique dans son ensemble (comme CH_4) ne suivent pas l'ordre d'électronégativité. Les chimistes ont décidé dans ces cas précis de mettre en avant un ou plusieurs atomes jugés particulièrement importants : l'azote dans la base aminée, le groupement hydroxyle dans les hydroxydes, le carbone dans les molécules organiques. Il arrive même, en chimie organique, que des informations de structure moléculaire soient véhiculées par la formule moléculaire. C'est le cas de la formule de l'acide acétique (CH_3COOH) qui reproduit, bien qu'imparfaitement, la connectivité des atomes dans la molécule. Les formules moléculaires, et plus spécifiquement l'ordre des symboles chimiques, sont par conséquent riches de significations portant non seulement sur la composition, mais également sur la structure et la réactivité. En chimie, il s'ensuit que les règles d'écriture (comment on écrit) sont pleinement au service de l'intention (ce que l'on veut communiquer).

Enfin, la signification d'un symbole chimique pris isolément (par exemple « C ») n'est pas identique à la signification de ce même symbole dans une combinaison (par exemple « CO_2 »). Dans une réaction chimique, les éléments ne changent pas. Par contre, les atomes, supports matériels de l'élément, peuvent être considérablement modifiés par la déformation du nuage électronique menant à l'établissement de liaisons ioniques ou covalentes. Or, la conservation du symbole dans une formule moléculaire ne véhicule que l'idée de conservation des éléments (Roundy, 1989). Ce fait facilite d'ailleurs la démarche de pondération des équations de réaction, les symboles se reconnaissant de part et d'autre de la flèche. Mais le processus de transformation au niveau atomique est, quant à lui, caché dans les formules moléculaires. Pour pouvoir visualiser les changements dus aux atomes partenaires, il faut se reporter aux représentations des liaisons chimiques dans lesquelles on peut retrouver des signes précisant les charges pleines (« Ca^{2+} ») ou partielles (« H^+ ») portées par les atomes. Bien entendu, les équations

de dissociation ionique ou d'oxydoréduction peuvent contenir ce genre de signes, mais il est plus fréquent de travailler avec des équations de réaction sans ions au début de l'apprentissage de la chimie. Le renoncement aux signes précisant certains changements électroniques dans les formules moléculaires trouve sa source principale dans un souci de garantir une expression graphique légère et fluide, mais qui perd de facto en précision. Chargés sémantiquement, les symboles chimiques voient donc une partie de leur contenu sémantique modifié par leurs partenaires dans une combinaison.

Il nous semble utile, pour clore cette partie, de décrire brièvement quelques difficultés qui accompagnent souvent l'apprentissage de la langue symbolique des chimistes par des élèves débutants. D'abord, associer un symbole chimique et un élément semble constituer un obstacle important pour de nombreux apprenants, de par le manque de connexion entre certains termes et certains symboles (Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012 ; Dehon et Snauwaert, 2015b). En outre, nombreux sont les élèves confondant les concepts d'indice et de coefficient, dont l'utilisation correcte est pourtant l'une des compétences fondamentales dans l'écriture des formules chimiques (Friedel et Maloney, 1992). La distinction entre atomes et molécules s'en trouve altérée, ce qui s'observe dans les représentations iconiques produites par les élèves (Cokelez et Dumon, 2005 ; Dehon et Snauwaert, 2014). Ces dysfonctionnements dans les fondements de l'écriture symbolique sont autant de sources de confusion et d'incompréhension face à une écriture plus complexe comme une équation de réaction (Yarroch, 1985 ; Savoy et Steeples, 1994 ; Barlet et Plouin, 1994 ; Laugier et Dumon, 2004 ; Sanger, 2005 ; Dawidowitz, Chittleborough et Murray, 2010 ; Dehon et Snauwaert, 2015b). Enfin, la langue symbolique des chimistes appartient à l'un des trois niveaux de savoir (symbolique, microscopique, macroscopique) définis par Johnstone (1982). Il a été souligné que les élèves éprouvent de grandes difficultés à circuler entre ces trois niveaux de savoir, notamment à partir d'un symbole chimique (Dehon et Snauwaert, 2015a).

FONCTIONNEMENT DE L'ANALOGIE DE L'ALPHABET

Analyse selon les cadres théoriques de l'analogie

Si l'on analyse les différents énoncés de l'analogie de l'alphabet selon le cadre théorique de Gentner, il apparaît qu'au moins quatre versions distinctes de cette analogie coexistent dans la littérature, selon les objets, relations et attributs mis en correspondance⁸ :

1. La première version est l'analogie entre les phonèmes et les atomes. Nous l'appellerons « structurelle phonologique » car elle implique le recours à la structure de la langue orale. Cette analogie n'est présente que dans les ouvrages ou les articles traitant spécifiquement de linguistique (Walter, 1984 ; Siouffi et Van Raemdonck, 2012). D'ailleurs, dans ce cas précis, la chimie constitue la source et la structure orale de la langue joue le rôle de cible dans l'analogie. Les phonèmes assument ici le rôle d'« alphabet » de la langue orale, pendant des lettres dans l'expression graphique de la langue. La représentation de cette analogie structurelle phonologique selon le cadre de Gentner (figure 3) met en évidence la présence de la relation de composition (entre phonèmes et morphèmes ; entre atomes et molécules) et le peu d'attributs mis en correspondance.

Cette forme de l'analogie de l'alphabet pêche par un manque de proximité entre le domaine cible et le

domaine source, ce qui affaiblit son fonctionnement. De plus, le domaine source qu'est l'organisation de la matière vue par le chimiste n'est pas forcément familier pour un étudiant en lettres. On notera que, dans de rares cas, c'est l'élément chimique qui est mis en correspondance avec le phonème.

2. La deuxième version est l'analogie entre les lettres de l'alphabet et les éléments chimiques. Nous l'appellerons « structurelle macroscopique » car elle implique, au niveau des combinaisons, une mise en correspondance entre les corps purs (ou « composés ») et les mots. Cette analogie est particulièrement présente dans les livres de référence universitaires (Hill *et al.*, 2008 ; Tro, 2015). On retrouve, en figure 4, la représentation de cette version de l'analogie de l'alphabet selon le cadre de Gentner. La mise en correspondance d'un système graphique avec la structure de la matière affaiblit la portée de l'analogie en éloignant le domaine cible du domaine source. Par contre, les élèves sont plus familiers avec la structure graphique de la langue qu'avec sa structure phonologique, ce qui renforce la pertinence du domaine source dans cette version de l'analogie (ainsi que dans les versions suivantes).

3. La troisième version est l'analogie entre les lettres de l'alphabet et les atomes. Nous l'appellerons « structurelle microscopique » car elle implique, au niveau des combinaisons, une mise en correspondance entre les molécules et les mots. On retrouve cette version de l'analogie principalement dans les

Figure 3. Analyse selon Gentner de l'analogie structurelle phonologique, mettant en correspondance les atomes et les phonèmes

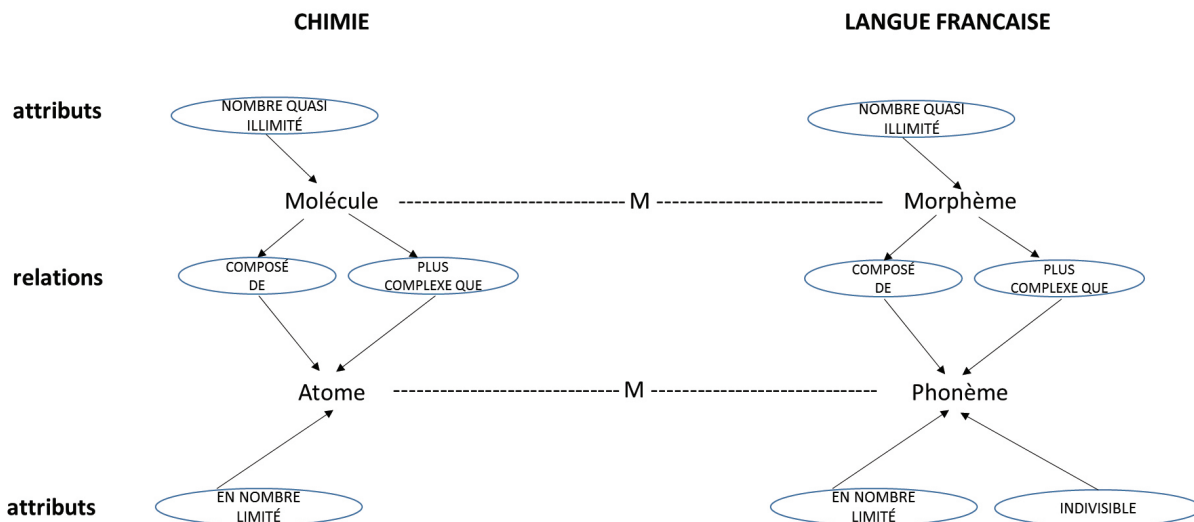
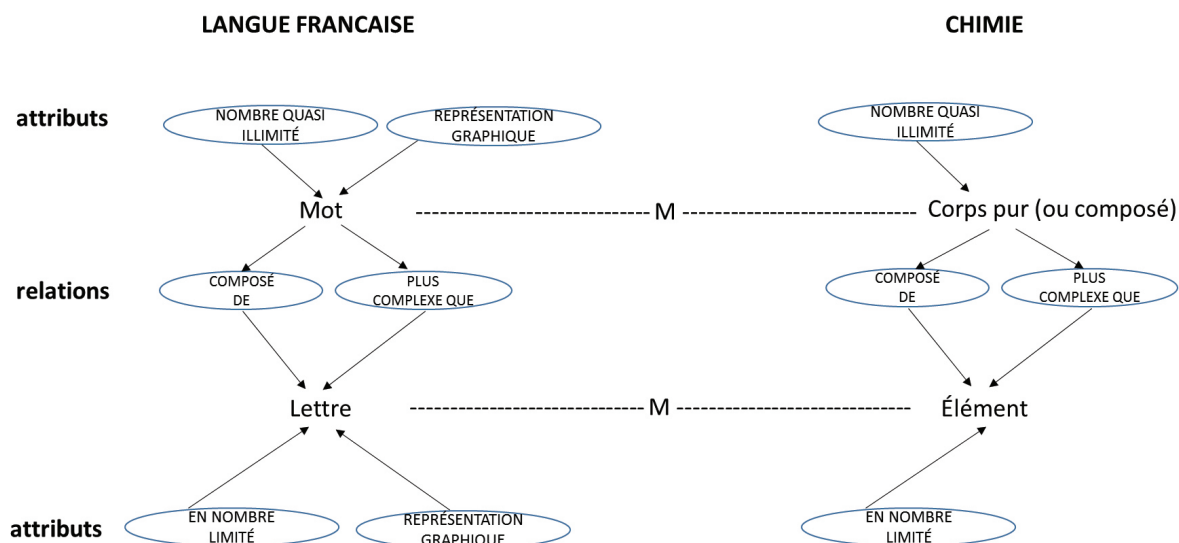


Figure 4. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle macroscopique, mettant en correspondance les lettres de l'alphabet et les éléments



manuels scolaires (Matthys *et al.*, 2011 ; Pirson *et al.*, 2015). En observant la figure 5, on remarque que les propriétés de cette version de l'analogie de l'alphabet sont comparables à celles de l'analogie structurelle macroscopique développées ci-avant.

Cependant, dans les manuels scolaires consultés, une nouvelle relation est développée dans le passage consacré à cette analogie : une relation de combinaison qui implique l'usage de règles et ayant pour conséquence d'interdire certaines combinaisons (mots, molécules) et certains arrangements dans l'espace (de lettres, d'atomes). Cette relation supplé-

mentaire renforce la proximité entre domaine cible et domaine source.

4. La quatrième et dernière version de l'analogie compare les lettres de l'alphabet et les symboles chimiques. Nous l'appellerons « structurelle graphique », car elle implique une mise en correspondance entre les écritures graphiques en langue française et en chimie (figure 6). Cette version de l'analogie de l'alphabet est présente tant dans les manuels scolaires (Pirson *et al.*, 2015) et les livres de référence universitaires (Wouters, 2014), que dans les articles de recherche en didactique de la chimie

Figure 5. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle microscopique, mettant en correspondance les lettres de l'alphabet et les atomes

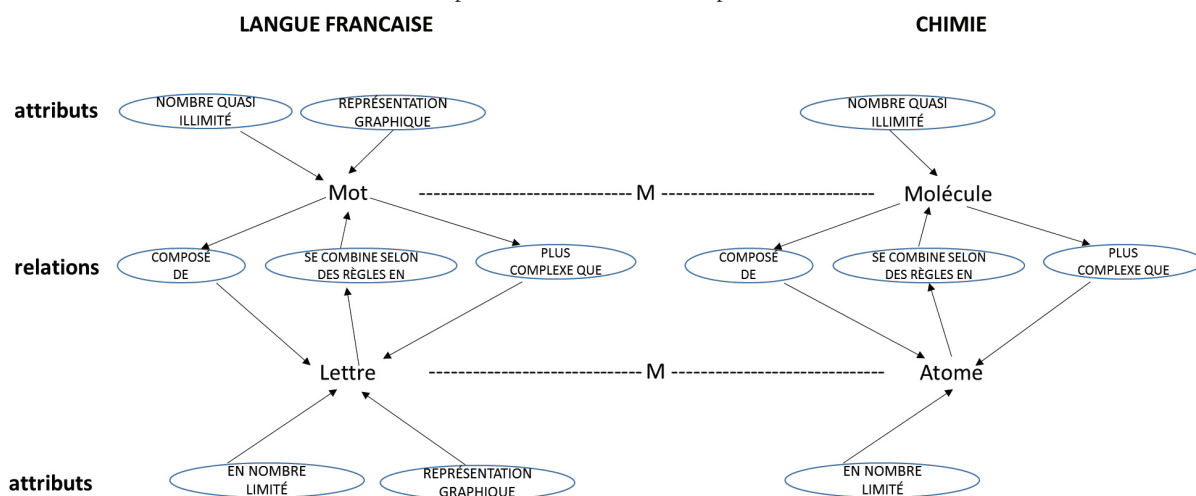
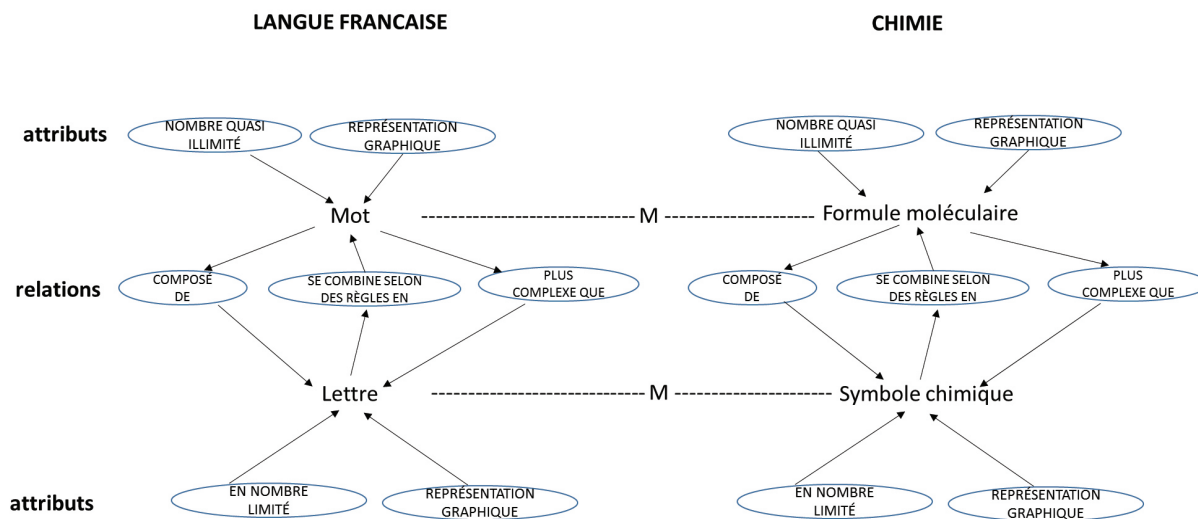


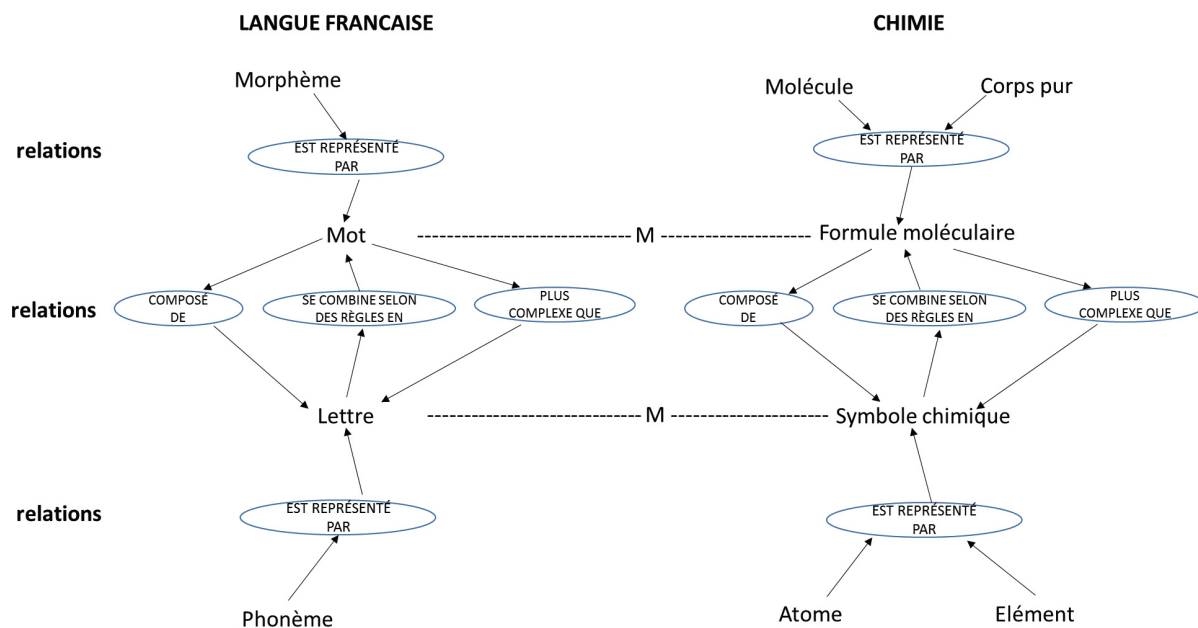
Figure 6. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle graphique, mettant en correspondance les lettres de l'alphabet et les symboles chimiques



(Markow, 1988 ; Laszlo, 1993 ; Jacob, 2001 ; Nemeth, 2006 ; Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012) dans lesquels elle constitue la version majoritaire. Ce sont principalement les attributs des lettres et symboles chimiques qui renforcent la proximité entre les deux domaines dans cette version de l'analogie : ces représentations graphiques sont constituées des mêmes

symboles de base, présents en nombre limité. Cette proximité forte entre attributs des objets et entre relations, conjuguée à la grande familiarité que les apprenants entretiennent avec l'écriture graphique de la langue française, rend cette analogie structurelle graphique apte à marquer durablement les élèves.

Figure 7. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle graphique et relations avec les autres versions de l'analogie



L'analogie structurelle graphique a ceci de particulier qu'elle combine potentiellement les quatre versions de l'analogie de l'alphabet en une seule mise en correspondance, comme le montre la figure 7 (par souci de lisibilité, nous n'avons pas représenté les attributs.)

C'est bien entendu la charge sémantique du symbole chimique qui est en grande partie responsable d'un tel phénomène. En effet, le symbole chimique « C », par exemple, véhicule à la fois les concepts d'atome de carbone (et ses caractéristiques principales comme le nombre de protons) et d'élément carbone (en tant que catégorie virtuelle regroupant tous les atomes de même numéro atomique). Du côté linguistique de l'analogie, c'est la lettre de l'alphabet, en tant que représentante graphique des phonèmes, qui permet d'intégrer l'analogie structurelle phonologique dans le schéma général de l'analogie structurelle graphique. Cette relation de représentation dépasse les similitudes syntaxiques de Gentner et permet d'aborder les relations sémantiques et pragmatiques qu'entretiennent un système graphique et les concepts qu'il représente. Cette version de l'analogie de l'alphabet peut ainsi être développée du point de vue pragmatique et sémantique de Holyoak, comme le montre le tableau 3.

Les buts et ressources sont par essence similaires dans une analogie comprenant deux systèmes graphiques. En effet, dans les deux cas, des symboles représentant des unités distinctives constituent des ressources essentielles à la représentation d'unités significatives plus complexes. De par la présence

de la linguistique de l'écrit dans le système symbolique des chimistes, l'espace restreint du support d'écriture (papier, tableau, etc.) devient une contrainte importante. La solution de combinaison des unités graphiques (les lettres de l'alphabet, les symboles chimiques) ainsi que le résultat final (le mot, la formule moléculaire) sont également mis en correspondance.

De fortes similitudes pragmatiques (buts, ressources, contraintes, solution, résultat) et sémantiques (caractéristiques d'un système de représentation) sont ainsi observées entre les domaines cible et source, ce qui renforce encore la pertinence de cette version de l'analogie de l'alphabet, ainsi que sa capacité d'imprégnation.

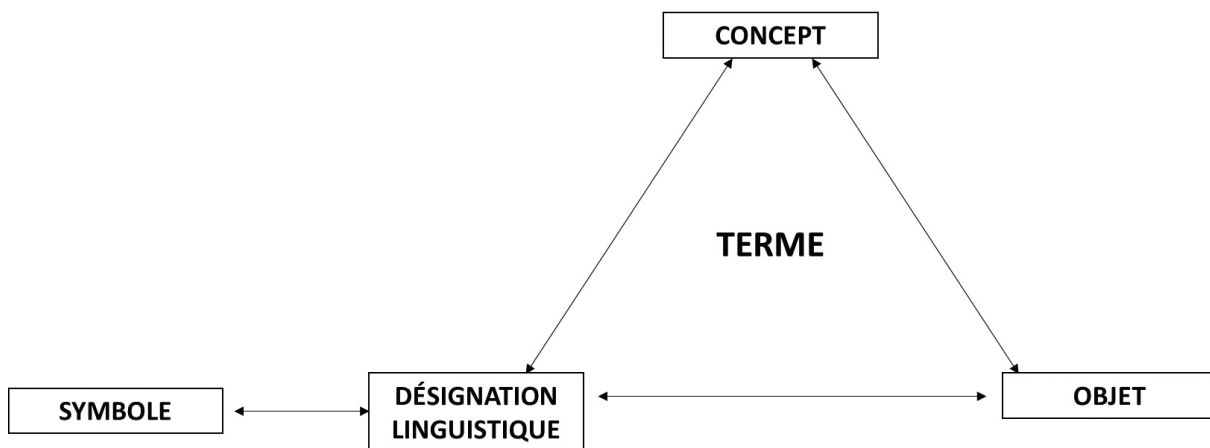
Points de divergence dans l'analogie structurelle graphique

L'analogie structurelle graphique présente cependant quelques points de divergence importants entre les deux domaines mis en correspondance. Premièrement, si les deux systèmes symboliques ont une vocation à dominante graphique, les formules chimiques, elles, ne sont pas conçues pour être énoncées oralement. Même s'il peut arriver à un chimiste de dire [aʃ-dø-ɔ]⁹ pour exprimer la formule chimique H₂O, ce n'est qu'un emprunt acoustique au français moderne. Ceci démontre que, dans le cas du code symbolique chimique, l'oral est subordonné à l'écrit. La langue symbolique des chimistes,

Tableau 3. Analyse selon Holyoak du problème de l'écriture graphique de la langue française et de l'écriture graphique en chimie

Schéma de problème	Ecriture graphique du français	Ecriture graphique en chimie
Buts	Utiliser des symboles pour représenter des images acoustiques, de sons	Utiliser des symboles pour représenter des corps purs / des molécules
Ressources	Symboles en relation avec des unités distinctives (phonèmes)	Symboles en relation avec des unités distinctives (éléments / atomes)
Contraintes	Espace restreint Nombre de symboles limité	Espace restreint Nombre de symboles limité Insertion dans un texte en langue française
Solution	Utiliser des lettres combinées pour représenter les phonèmes, puis les morphèmes	Utiliser des symboles combinés pour représenter les éléments / atomes, puis les corps purs / molécules
Résultat	Le mot est constitué de lettres combinées	La formule moléculaire est constituée de symboles chimiques combinés

Figure 8. Relations entre les différentes facettes d'un terme en terminologie



contrairement aux graphèmes des langues ordinaires, n'est pas faite pour rendre des sons, mais bien pour représenter des substances. Il est davantage question ici d'abréger que de reproduire. Cette distinction est essentielle pour expliquer le contenu sémantique des symboles des deux systèmes.

Deuxièmement, nous avons constaté que les lettres de l'alphabet ne pouvaient reproduire tous les phonèmes de la langue française ; il est nécessaire de combiner les lettres entre elles pour « traduire » certains phonèmes à l'écrit. Le « z » ou le « y », par exemple, ont ainsi été introduits dans l'alphabet latin pour intégrer au vocabulaire des mots empruntés au grec et pour reproduire des phonèmes particuliers. Mais de tels apports sont rares aujourd'hui. En chimie, chaque élément est représenté par un seul et unique symbole chimique. D'ailleurs, il est régulièrement nécessaire d'ajouter de nouveaux symboles lors de la découverte de nouveaux éléments. C'est le cas, par exemple, des atomes artificiels récemment synthétisés. « Nh » (pour « nihonium »), « Mc » (pour « moscovium »), « Ts » (pour « tenesine ») et « Og » (pour « oganesson ») ont été ajoutés à l'ensemble des symboles chimiques concentrés dans le tableau périodique de Mendeleïev. Donc, contrairement à l'alphabet latin, le système symbolique des chimistes se distingue par son expansion permanente.

Troisièmement, il est intéressant de noter que si les phonèmes possèdent plusieurs graphèmes, il n'en est rien pour les éléments chimiques. En effet, l'azote est partout symbolisé par la lettre « N » dans les langues utilisant l'alphabet latin, même si le terme scientifique qui lui est associé peut varier fortement

(« nitrogen » en anglais, « Stickstoff » en allemand). Tous les autres symboles concurrents (comme « Az ») ont été éliminés au cours du développement – parfois chaotique – du langage de la chimie moderne. Cette relation exclusive entre symboles chimiques et éléments chimiques est essentielle en ce qu'elle exige une rigueur d'utilisation, ainsi qu'une compréhension profonde du lien entre l'organisation de la matière et son pendant graphique.

Quatrièmement, contrairement aux lettres de l'alphabet qui ne véhiculent, pour jouer efficacement leur rôle, aucune signification en elles-mêmes (en dehors de leur rôle de représentation graphique du phonème), les symboles chimiques sont par essence connectés aux termes en chimie. Par exemple, le symbole chimique « C » est une abréviation du terme « carbo » en latin, qui donnera « carbone » en langue française. Cette relation abréviation/abrégi constitue une grande part du contenu sémantique des symboles chimiques, sans pour autant le remplir. Pour en saisir la portée, il est nécessaire de comprendre la nature d'un terme scientifique. En terminologie, un terme scientifique est composé de trois facettes : la désignation linguistique, le concept et l'objet de référence (Depecker, 2003)¹⁰. Il en résulte que les symboles chimiques, reliés aux désignations de nature linguistique par une relation abréviation/abrégi, sont également reliés aux concepts et aux objets¹¹ (figure 8).

Le lien entre symboles chimiques (par exemple, le symbole « Na ») et objets réels (par exemple, la substance « sodium ») s'avère ainsi plus distendu, moins direct, mais l'entremise d'intermédiaires puissants

(désignation linguistique, concept chimique) permet malgré tout de passer de l'un à l'autre. L'analogie entre symboles chimiques et lettres de l'alphabet s'en trouve à tout le moins bousculée : il devient tout à coup moins pertinent de placer sur un même pied un système constitué de symboles (volontairement) neutres sans concepts attachés, et un système de symboles (volontairement) chargés de sens, connectés à des concepts et à des objets réels.

IMPLICATIONS POUR L'ENSEIGNEMENT

L'analyse de l'analogie de l'alphabet selon les cadres théoriques de Gentner et de Holyoak a révélé l'existence de quatre versions différentes de l'analogie de l'alphabet. Il apparaît que selon l'objet chimique mis en correspondance, le discours du professeur se trouve positionné dans l'un ou l'autre des niveaux de savoir : symbolique, microscopique ou macroscopique. Or, un jeune apprenant éprouve précisément des difficultés à se situer et à circuler entre les niveaux de savoir (Gabel, 1999 ; Chittleborough et Treagust, 2007 ; Talanquer, 2011 ; Taber, 2013). Cette difficulté se trouve renforcée par l'utilisation d'un symbole chimique qui est, par nature, connecté aux deux autres niveaux (Dehon et Snauwaert, 2015a). Il nous paraît dès lors essentiel que l'enseignant prenne conscience de la nécessité d'explicitier le niveau auquel se situe la version de l'analogie qu'il a choisie de formuler.

En outre, pour éviter ce problème, certains professeurs pourraient opter pour une solution de facilité : vider la lettre de l'alphabet de sa dimension phonologique et évacuer le contenu sémantique des symboles chimiques. Il est alors possible de réaliser une analogie basée uniquement sur la mise en correspondance des symboles chimiques et des lettres de l'alphabet. Cette version de l'analogie de l'alphabet (analogie structurelle graphique) est la plus susceptible de fonctionner dans l'esprit des élèves de par les similitudes syntaxiques et pragmatiques mises en évidence. Or, vider le symbole chimique de son contenu chimique (tant macroscopique que microscopique) le transforme en une figure de papier, un signe indépendant jouant dans un système tournant en vase clos. Nombreux sont alors les jeunes apprenants pris dans une boucle symbolique dans laquelle un symbole chimique (« C ») est l'écriture simplifiée de la désignation linguistique qui lui est asso-

cié (« carbone »). Pour ceux-là, la connexion avec les concepts d'élément ou d'atome est brisée (Dehon et Snauwaert, 2015a). L'écriture symbolique devient alors une écriture pour elle-même, sans autre signification que le respect des règles syntaxiques ou morphologiques qui la gouvernent. Pire, il arrive que certains élèves n'associent même plus le symbole à la désignation linguistique, et donc au terme¹². Dans ce cas, le symbole chimique redevient la lettre de l'alphabet latin qu'il était à l'origine ; cette lettre vide de sens ne sert alors qu'à un éventuel dénombrement, utile dans un exercice de pondération d'équation de réaction, mais incapable d'éclairer sur les concepts chimiques qui la sous-tendent. Réduire le rôle d'un symbole chimique à celui d'une lettre de l'alphabet conduit donc à rompre la circulation entre les niveaux de savoir et ainsi couper les élèves des véritables objectifs poursuivis dans le cadre du cours de chimie.

Le rapprochement des deux systèmes de signes comporte d'autres implications didactiques, telle que la projection des propriétés de l'un sur les propriétés de l'autre. La plus importante de ces projections potentielles concerne la juxtaposition des lettres formant les mots. En effet, la visualisation d'une simple juxtaposition graphique des symboles atomiques vient concurrencer les modèles décrivant ce qu'il se passe durant une réaction chimique. L'équation de combustion du carbone en dioxyde de carbone est un bon exemple d'application de la juxtaposition des symboles (et donc des atomes, pour un jeune apprenant). Le carbone et le dioxygène semblent s'assembler en dioxyde de carbone sans modification de leur structure initiale. Il s'ensuit un phénomène déjà rencontré auprès d'élèves de 14-15 ans : l'apparente juxtaposition des symboles dans une équation de réaction cache complètement la rupture et la formation de liaisons chimiques, jusqu'à modifier le concept de réaction chimique lui-même (Dehon et Snauwaert, 2014). À ce problème s'ajoutent, pour les élèves, l'impression de conservation des réactifs induite par l'usage d'un même symbole de part et d'autre de la flèche, ainsi que la production de formules moléculaires empruntant des propriétés particulières à l'écriture graphique en français (une seule majuscule en début de formule comme dans « Caco3 » ; écriture de la formule en fonction de l'ordre d'énonciation du terme en français comme « ClNa » pour « chlorure de sodium »). Le transfert de propriétés du système alphabétique au

système chimique peut ainsi constituer un distracteur supplémentaire pour les élèves, susceptible d'engendrer chez eux des conceptions chimiques erronées.

De telles implications potentielles ne nous permettent cependant pas de condamner complètement cette version de l'analogie de l'alphabet. En effet, si l'on adopte le point de vue de Sander, réaliser une analogie entre l'écriture de la langue française et l'écriture symbolique en chimie permet de faire rentrer pleinement le code symbolique des chimistes dans la catégorie des langues. Cette catégorisation modifie la perception que peuvent avoir les élèves de l'apprentissage de la chimie : en plus d'assimiler des concepts, il est nécessaire de maîtriser une langue à part entière. L'analogie structurelle graphique permet ainsi de montrer, explicitement et implicitement (via des analogies naïves) les relations de composition et de combinaison dans l'écriture des formules moléculaires et des mots. Construire leur compréhension de la chimie sur base de cette analogie peut soulager quelque peu le travail d'abstraction et de traitement, souvent astreignant, que les élèves doivent fournir quand ils abordent le code symbolique et les concepts chimiques.

Vues sous ces angles nouveaux, l'analogie de l'alphabet semble poser plus de problèmes potentiels qu'elle ne fournit de retombées positives dans un cadre didactique. Cependant, il est possible de se servir de la version structurelle graphique de l'analogie de l'alphabet pour aborder les caractéristiques originales qui rendent la langue symbolique des chimistes différente d'une langue ordinaire. Nous proposons en effet d'exploiter cette analogie en tant que mise en situation d'apprentissage propre à générer des questionnements à visée diagnostique, dont nous citerons quatre exemples. L'analogie structurelle graphique sert alors de point de départ dans une démarche d'analogie par comparaison de situations, qui permet de limiter les effets induits négatifs d'une généralisation abusive de relations ou d'attributs du domaine source au domaine cible (Gentner *et al.*, 2003).

Question numéro 1 : « Qu'est-ce qui différencie la lettre "C" du symbole chimique "C" ? » Cette question peut être introduite après l'étude des symboles et des modèles atomiques. Elle servira alors d'outil diagnostique susceptible de réguler l'apprentissage des élèves avant d'aborder d'autres notions comme les formules moléculaires. En effet, le professeur pourra identifier les conceptions, correctes ou erro-

nées, que les élèves ont associées aux symboles chimiques. Le fait de comparer le symbole chimique à une lettre alphabétique permet de révéler la représentation que se font les apprenants de ce que signifie une lettre de l'alphabet, et donc de sonder la distinction qu'ils opèrent, parfois inconsciemment, entre les deux symboles d'apparence identiques. Les représentations des élèves collectées, le professeur pourra réactiver et, surtout, structurer le contenu sémantique d'un symbole chimique : celui-ci est connecté à une désignation linguistique (en tant que partie linguistique du terme), mais aussi à un atome et à un élément donné. Les relations entre symbole, désignation linguistique, atome et élément peuvent alors être définies en insistant sur les trois niveaux de savoir.

Question numéro 2 : « Le nombre de symboles atomiques est-il fixé définitivement comme semble l'être le nombre de lettres de l'alphabet ? » Cette question peut également s'insérer entre l'évolution des modèles atomiques et l'établissement des formules moléculaires. Elle permet de s'interroger sur les limites d'un modèle scientifique. Le professeur pourra se baser sur la représentation d'un alphabet fixe (ou très peu modifiable à l'heure d'aujourd'hui¹³) pour bâtir la représentation d'une chimie utilisant des modèles (et donc des écritures) temporaires et modifiables par nature. L'exemple récent d'atomes artificiels dont les symboles ont été introduits dans le tableau périodique permet de soutenir durablement dans l'esprit des élèves l'idée d'une science en mouvement, dont les outils (ici, le tableau périodique) sont en permanence actualisés.

Question numéro 3 : « Pourquoi certaines combinaisons de lettres (comme <pfmb> en français) ou de symboles chimiques (« NaNe » par exemple) n'existent-elles pas ? » Cette question constitue une mise en situation intéressante avant d'aborder la notion de valence. Dans un premier temps, le professeur peut s'appuyer sur l'analogie avec la langue pour distinguer les deux systèmes de signes : une combinaison comme <pfmb> n'a pas été sélectionnée par l'usage en langue française, car elle ne s'énonce pas aisément, en tenant compte des principaux phonèmes disponibles. Ces raisons de nature phonologique ne peuvent être appliquées à la chimie. Il s'agit donc, dans un deuxième temps, de se pencher sur ce qui fait la spécificité des combinaisons d'atomes en molécules. La comparaison de plusieurs assemblages stables permet de faire émerger un nombre de liaisons possibles, propre aux atomes les plus fréquents.

Question numéro 4 : « Pourquoi certains ordres de lettres ou de symboles sont-ils sélectionnés graphiquement tant en langue française (on écrit <château> plutôt que <chato>) qu'en chimie (on écrit « HCl » plutôt que « ClH ») ? » De nouveau, si, dans la langue française, ce sont principalement des impératifs phonologiques¹⁴ qui constituent les ressorts théoriques, la situation est tout autre en chimie. Le professeur peut insister sur les objectifs qui sous-tendent les conventions en chimie : ordre d'électronégativité, mise en évidence de groupements réactionnels et de fonctions systématiques, etc. Les élèves doivent comprendre que derrière chaque choix se cachent des intentions : quel message veut-on faire passer en priorité avec cette formule symbolique ? C'est la réponse à cette question qui guide l'ordre des symboles chimiques. Il est enfin essentiel que l'enseignant insiste sur le caractère universel des conventions chimiques : une formule symbolique doit être comprise partout et par tous.

Ces propositions didactiques ne sont que quelques exemples concrets qui n'épuisent pas les possibilités d'exploitation de l'analogie de l'alphabet, vue sous un angle différent : celui d'une « opposition constructive » permettant d'affiner ce qui distingue les deux systèmes de signes.

CONCLUSION

Faut-il brûler l'analogie de l'alphabet sur l'autel de la didactique ? Présentée comme une illustration aux limites évidentes (« obvious », Markow, 1988), l'analogie de l'alphabet ne semble être, pour certains auteurs, qu'un détail didactique, un moyen d'introduire à bon compte la langue symbolique chimique. Si tant est qu'il existe des détails en didactique des sciences, notre étude tend toutefois à montrer que ceux-ci peuvent potentiellement induire des conséquences pour les élèves. À l'aide des cadres théoriques de Gentner et de Holyoak, nous avons d'abord démontré la coexistence de quatre versions de l'analogie, selon les objets mis en correspondance dans les domaines cible et source. L'analogie liant les symboles chimiques et les lettres de l'alphabet, que nous avons appelée « structurelle graphique », inclut potentiellement les trois autres de par la richesse du contenu sémantique du symbole chimique. Les nombreuses similitudes syntaxiques et pragmatiques ainsi que la familiarité des élèves avec l'écriture du français

soutiennent l'hypothèse d'un fonctionnement efficace et d'une imprégnation forte de cette version de l'analogie de l'alphabet dans l'esprit des apprenants. Cette imprégnation supposée soutient un objectif didactique important : faire entrer le code symbolique des chimistes dans la catégorie des langues. Une prise de conscience de l'aspect linguistique d'un cours de chimie nous semble en effet pertinente pour mieux assimiler les concepts à transmettre, tant du point de vue des élèves que du point de vue des enseignants. Sur le plan des impacts didactiques négatifs potentiels, nous avons identifié deux obstacles majeurs à cette version de l'analogie : le renforcement de la boucle symbolique entre désignation linguistique et symbole, et la conceptualisation de la réaction chimique comme une juxtaposition d'atomes. En effet, vidés de leur contenu sémantique pour ressembler aux lettres de l'alphabet, les symboles chimiques ne jouent plus le rôle qui leur est assigné : représenter des atomes au niveau microscopique et des substances au niveau macroscopique. Inscrits dans une formule moléculaire comparée à un « mot », les symboles chimiques peuvent également engendrer l'idée que la réaction chimique ne constitue qu'un collage de deux ensembles prédéfinis, formant un ensemble complexe qu'il suffirait de décoller pour récupérer les ensembles initiaux. Ces conséquences didactiques négatives ont cependant fait émerger une série de possibilités basées sur un retournement de l'analogie (structurelle graphique) de l'alphabet : il s'agit de se servir de ses failles plutôt que de ses forces. Intégrer plus régulièrement l'analogie de l'alphabet au cours de chimie via une démarche d'analogie par comparaison de situations permettrait, d'une part, d'en réduire les défauts, et d'autre part d'en exploiter les qualités. Car nous ne pouvons échapper à cet enjeu linguistique et didactique qu'est l'apprentissage des langages propres à la chimie. Les acteurs de terrain se doivent de saisir toutes les chances de construire progressivement et explicitement le code symbolique chimique, qui constitue l'outil de communication de tous les chimistes. L'analogie de l'alphabet, présentée en tenant compte des précautions d'usage que nous avons développées, constitue l'une de ces opportunités.

NOTES

1. Nous emploierons l'expression « analogie de l'alphabet » pour représenter l'analogie entre les symboles chimiques (atomes ou éléments) et l'alphabet français. Nous considérons en effet uniquement l'alphabet français pour cette étude, bien que l'ensemble de l'analyse s'applique à toute autre langue incluant un système symbolique graphique. Par ailleurs, nous utiliserons parfois l'adjectif « latin » pour décrire l'alphabet français, même si quelques différences subsistent aujourd'hui entre les deux systèmes de signes. Nous justifierons l'usage du terme « analogie » dans la suite de l'article.

2. Le concept de « mot » est très vaste en linguistique. Le mot peut être graphique (suite de lettres entre deux blancs), phonétique (suite de sons entre deux pauses), sémantique (porteur d'une unité de sens) ou lexical (entrée du dictionnaire, etc.). Ce dernier type de mot est aussi appelé « lexème ». Si le mot reste, dans le langage courant, l'unité de base de la langue, c'est le morphème qui est considéré en linguistique comme la plus petite unité significative (Siouffi et Van Raemdonck, 2012).

3. Les graphèmes sont représentés conventionnellement entre crochets (<x>) tandis que les phonèmes sont représentés entre barres obliques (/x/).

4. Les symboles font partie de la catégorie des signes. Les signes sont des signaux particuliers, c'est-à-dire des éléments intentionnels. Les signaux ont donc pour fonction première de transmettre volontairement du sens. Parmi les signaux, on trouve les signes linguistiques, les signes non linguistiques, les symboles et les icônes. Le signe linguistique tel que défini par Saussure (1915) est bifacial : il est caractérisé par le signifiant (image acoustique ou expression phonique) et le signifié (rapproché du « concept » sans lui être équivalent). Par exemple, le signe linguistique « arbre » présente à la fois une image acoustique, l'expression phonologique du mot « arbre », et un contenu sémantique, qui comprend les caractéristiques du concept d'« arbre ». Le référent concret est, dans ce cas, l'objet réel « arbre » sous toutes ses formes. Le symbole est communément défini comme résultant d'une relation conventionnelle et arbitraire commune à plusieurs cultures. L'icône est quant à elle créée en respectant un lien analogique avec la réalité.

5. Les molécules sont ici considérées comme un ensemble d'atomes liés en nombre fixé, quel que soit le type de liaisons (Pirson et al., 2015). Cette définition permet de décrire KOH, KI ou NaCl comme des molécules (figure 1), ainsi que le programme de l'enseignement secondaire belge le permet. Dans le cas de ces réseaux ioniques, le nombre

d'atomes dans la « molécule » est égal au nombre d'éléments (ou d'atomes) figurant dans la formule empirique du corps pur.

6. Le mot « métalloïde » n'est plus guère utilisé à notre époque. À l'époque de Berzelius, cette catégorie regroupait ce qui constitue actuellement la classe des non-métaux, mais aussi les halogènes et les gaz rares. Aujourd'hui, même si leur usage est marginal, les métalloïdes sont définis comme des éléments ni métalliques, ni nonmétalliques, leurs propriétés étant classées comme intermédiaires. Ils se trouvent d'ailleurs placés entre les métaux et les non-métaux dans le tableau périodique de Mendeleïev (B, Si, Ge, etc.).

7. Dans ces cas précis, ce sont des mots d'origine germanique (*Zinke*, *Wolfram*) ou en usage dans les langues germaniques (*Kalium*, *Natrium*) qui ont servi de base à la construction des symboles chimiques.

8. Nous avons modifié le sens de certaines flèches par rapport au cadre théorique de Gentner. Le sens des flèches reliant des relations aux objets a été inversé afin de rendre compte plus clairement de la relation entretenue. Ainsi, dans la figure 3, une flèche part de l'objet « molécule » vers la relation « composé de », alors qu'une autre flèche part de la relation « composé de » pour aboutir à l'objet « atome ». Le sens des flèches indique donc que « la molécule est composée d'atomes ». Par contre, le sens des flèches reliant attributs et objets a été conservé par rapport au cadre théorique de Gentner.

9. Écriture de H₂O en phonétique.

10. Par exemple, en terminologie, le terme « cheval » comprend à la fois la désignation linguistique « cheval », le concept « cheval » et l'objet de référence « cheval ».

11. Dans son traité de terminologie, Depecker (2003) considère les symboles chimiques comme des désignations de nature symbolique. Le symbole « Al » peut donc être lu comme une des désignations possibles associées au concept d'« aluminium », ainsi qu'à l'objet « aluminium ».

12. Dans une publication précédente, nous avons montré qu'un certain nombre d'élèves assuraient que, dans l'expression « 4Na », le coefficient stoechiométrique représentait le « nombre de Na ». Une telle représentation rend compte de l'utilisation du symbole pour lui-même, déconnecté du terme « sodium » (Dehon et Snauwaert, 2015a). Ce phénomène est d'autant plus fréquent quand le symbole ne renvoie pas directement au terme en langue française (« W », « K », « Sn », etc.) (Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012).

13. Il n'est bien sûr pas question d'opposer l'idée d'un langage chimique en mouvement à celle d'une langue ordinaire figée : il est possible que l'alphabet latin évolue en

fonction de nouveaux besoins phonologiques. Mais, on l'a dit, les modifications du système symbolique des chimistes sont plus fréquentes.

14. De nombreuses contraintes orthographiques ou morphosyntaxiques jouent bien entendu un rôle important dans l'histoire de l'évolution de la langue.

RÉFÉRENCES

- Barlet, R., Plouin, D. (1994). L'équation-bilan en chimie. Un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster*, 18, p. 27-55.
- Berzelius, J. J. (1813). Essay on the Cause of Chemical Proportions, and on Some Circumstances Relating to Them: Together with a Short and Easy Method of Expressing Them. *Annals of philosophy*, 2, p. 443-454.
- Cartier, D. (2012). *L'écriture du monde*. Paris : Bourin Editeur.
- Chittleborough, G., Treagust, D. F. (2007). The modeling ability of non-major chemistry students and their understanding of the sub-microscopic level. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(3), p. 274-292.
- Cokelez, A., Dumon, A. (2005). Atom and molecule: upper secondary school French student's representations in long-term memory. *Chemistry Education Research*, 6, p. 119-135.
- Dagognet, F. (1969). *Tableaux et langages de la chimie – Essai sur la représentation*. Paris : Seuil.
- David, C. (2002). Atomes ou molécules ? Repéré le 14 juin 2016 à <http://phys.free.fr/>.
- Davidowitz, B., Chittleborough, G., Murray, E. (2010). Student-generated submicrodiagrams: a usefool tool for teaching and learning chemical equations and stoichiometry. *Chemistry Education Research and Practice*, 11, p. 154-164.
- Dehon, J., Snauwaert, P. (2014). Représenter une équation de réaction au niveau moléculaire : un exercice trop complexe ? 8^{es} rencontres scientifiques de l'Ardist (Marseille, 12-13-14 mars 2014), Marseille : ESPE de l'université d'Aix-Marseille (dir.), *Skholê*, 18(1), p. 153-162.
- Dehon, J., Snauwaert, P. (2015a). L'équation de réaction : une équation à plusieurs inconnues – Étude de productions d'élèves de 16-17 ans en Belgique francophone. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 12, 209-235.
- Dehon, J., Snauwaert, P. (2015b). Quelle est la place de l'équation de réaction dans les théories des niveaux de savoir en chimie ? Dans T. Evrard & B. Amory (dir.), *Les modèles : des incontournables pour enseigner les sciences !* (p. 177-192). Bruxelles : De Boeck.
- Depecker, L. (2003). *Entre signe et concept*. Paris : Presses de la Sorbonne Nouvelle.
- Dumon, A., Mzoughi-Khadhraoui, I. (2014). Teaching chemical change modelling to Tunisian students: an “expended chemistry triplet” for analysing teachers' discourse. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, p. 70-80.
- Eastes, R.-E. (2010). L'alphabet de la chimie. *L'actualité chimique*, 346, p. 3-4.
- Edeline, F. (2009). Les fonctions sémiotique et heuristique des symboles chimiques : ou de l'icône au symbole et retour. *Protée*, 37(3), p. 45-66.
- Friedel, A. W., Maloney, D.P. (1992). An exploratory classroom-based investigation of student's difficulties with subscripts in chemical formulas. *Science Education*, 76, p. 65-78.
- Gabel, D. (1999). Improving teaching and learning through chemistry education research: a look to the future. *Journal of chemical education*, 76, p. 548-554.
- Gentner, D. (1983). Structure-mapping: a theoretical framework for analogy. *Cognitive science*, 7, p. 155-170.
- Gentner, D., Loewenstein, J., Thompson, L. (2003). Learning and transfer: a general role for analogical encoding. *Journal of Educational Psychology*, 95, p. 393-408.
- Gick, M. L., Holyoak, K.J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive psychology*, 12, p. 306-355.
- Hill, J. W., Petrucci, R. H., McCreary, T. W., Perry, S. S. *Chimie générale*. Québec : Éditions du Renouveau Pédagogique.
- Hofstadter, D., Sander, E. (2013). *L'analogie, cœur de la pensée*. Paris : Odile Jacob.
- Jacob, C. (2001). Analysis and synthesis. *International Journal for Philosophy of Chemistry*, 1, p. 31-50.
- Johnstone, A.H. (1982). Macro- and microchemistry. [Notes and correspondence], *School Science Review*, 64(227), p. 377-379.
- Khanfour-Armalé, R., Le Maréchal, J.-F. (2008). Construire une catégorie grâce à une analogie : cas du concept d'élément chimique. *Aster*, 32, p. 117-157.
- Laszlo, P. (1993). *La parole des choses*. Paris : Hermann.
- Laugier, A., Dumon, A. (2004). L'équation de réaction : un nœud d'obstacles difficilement franchissable. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 5, p. 51-68.
- Lazard, G. (2006). Qu'est-ce qu'une langue ? *Bulletin de la société de linguistique de Paris*, 1, p. 1-28.
- Matthys, N., Feys, M., Suys, B. (2011). *Sciences 3e – Sciences de base*. Bruxelles : De Boeck.
- Markow, P.G. (1988). Teaching chemistry like the foreign language it is. *Journal of chemical education*, 65(4), p. 346-347.
- Mestrallet, R. (1980). *Communication, linguistique et sémiologie : contribution à l'étude de la sémiologie, étude sémiologique des signes de la chimie*. Universitat Autònoma de Barcelona, 2 vol.
- Mzoughi-Khadhraoui, I., Dumon, A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. *Recherches en didactiques des sciences et des technologies*, 6, p. 89-118.
- Nemeth, J. M. (2006). Translating a linguistic understanding of chemistry to outcome achievement and inter-

- disciplinary relevance in the introductory classroom. *Journal of chemical education*, 83(4), p. 592-594.
- Pirson, P., Bordet, H., Castin, D., Snauwaert, P. (2015). *Chimie 3^e*. Louvain-La-Neuve : De Boeck.
- Podolefsky N.S., Finkelstein, N. D. (2006). Use of analogy in learning physics: the role of representations. *Physical Review special topics – Physics Education Research*, 2, p. 1-10.
- Roundy, W. H. (1989). What is an element? *Journal of chemical education*, 66(9), p. 729-730.
- Sander, E. (2000). *L'analogie, du naïf au créatif*. Paris : L'Harmattan.
- Sanger, M.J. (2005). Evaluating student's conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing. *Journal of Chemical Education*, 82, p. 131-134.
- Savoy, L. G., Steeples, B. (1994). Concept hierarchies in the balancing of chemical equations. *Science Education Notes*, 75, p. 97-103.
- Saussure, F. de. (1915). *Cours de linguistique générale*. Paris : Payot.
- Siouffi, G., Van Raemdock, D. (2012). *100 fiches pour comprendre la linguistique*. Paris : Bréal.
- Song, Y., Carheden, S. (2014). Dual meaning vocabulary (DMV) words in learning chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, p. 128-141.
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14, p. 156-168.
- Taber, K. S. (2015). Exploring the language(s) of chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 16, p. 193-197.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: the many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33, p. 179-195.
- Tro, N. J. (2015). *Principes de chimie – une approche moléculaire*. Montreuil : Pearson France.
- Walter, G. (1984). Analogies de méthodes entre la linguistique et la chimie. *La linguistique*, 20, p. 23-40.
- Wouters, J. (2014). *Concentré de chimie*. Namur : PUN.
- Yarroch, W. L. (1985). Student's understanding of chemical equation balancing. *Journal of Research in Science Teaching*, 22, p. 449-459.
- Zali, A., Berthier, A. (dir.) (1997). *L'aventure des écritures. Naissances*. Paris : BNF.